

**А. И. Галеева, Р. И. Хуснутдинова, А. Э. Заворотько,
Ю. Г. Галяметдинов**

АДГЕЗИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНО-ОРГАНИЗОВАННЫХ СИСТЕМ С «СИННИМИ» УГЛЕРОДНЫМИ ТОЧКАМИ С ГИДРОФОБНЫМИ И ГИДРОФИЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Ключевые слова: лиотропные жидкие кристаллы, гибридные лиотропные среды, углеродные точки, C-точки, смачивание, адгезия.

Упорядоченные самоорганизующиеся лиотропные жидкие кристаллы (ЛЖК) находят широкое применение в биомедицине благодаря способности инкапсулирования биоматериалов различной химической природы: гидрофобные и гидрофильные субстраты. Создание комплексов ЛЖК с углеродными или квантовыми точками позволяет получать системы с комбинированными функциями. Углеродные точки, представляющие собой полупроводниковые наноматериалы, обладают уникальными люминесцентными свойствами и могут быть внедрены в лиотропные мезофазы для создания гибридных систем и их практического использования в качестве биосенсоров, медицинской визуализации, тераностики. Важно заметить, что среди базовых физико-химических характеристик поверхности на основе полимерных материалов основное внимание уделяется смачиваемости, адгезионному взаимодействию, трению и проницаемости. Известно, что смачиваемость гибридных систем определяемая поверхностным натяжением, которая весьма важна в процессе их взаимодействия с окружающей средой, например: поверхность капилляров, ткани стенок кровеносных сосудов, кожи, полимерные трубки и покрытия поверхности элементов медицинского оборудования. В данной работе представлены результаты смачивания гелей и лиомезофаз с C-точками модельных гидрофобных и гидрофильных поверхностей: стекло, нейлон, полидиметилсилоксан и политетрафторэтилена. Установлено, что маловязкие гели лучше смачивают данные поверхности по сравнению с более вязкими ЖК фазами, а работа адгезии гибридного образца, допированного углеродными точками при контакте со стеклом и мембраной имеет такой же порядок значений данной величины для подобных лиомезофаз на основе олигоэтиленоксида. Полученные в исследовании адгезионные характеристики ЛЖК и гелеобразных систем, могут быть полезны при разработке методов доставки препаратов диагностических и терапевтических наносистем с улучшенной функциональностью.

**A. I. Galeeva, R. I. Khusnutdinova, A. E. Zavorotko,
Yu. G. Galyametdinov**

ADHESIVE INTERACTION OF SUPRAMOLECULARLY ORGANIZED SYSTEMS WITH "BLUE" CARBON DOTS WITH HYDROPHOBIC AND HYDROPHILIC SURFACES

Key words: lyotropic liquid crystals, hybrid lyotropic media, carbon dots, C-dots, wetting, adhesion.

Ordered self-organizing lyotropic liquid crystals (LLC) are widely used in biomedicine due to their ability to encapsulate biomaterials of various chemical natures: hydrophobic and hydrophilic substrates. The creation of LLC complexes with carbon or quantum dots makes it possible to obtain systems with combined functions. Carbon dots, which are semiconductor nanomaterials, have unique luminescent properties and can be embedded in lyotropic mesophases to create hybrid systems and their practical use as biosensors, medical imaging, and theranostics. It is important to note that among the basic physico-chemical characteristics of a surface based on polymeric materials, the main focus is on wettability, adhesive interaction, friction and permeability. It is known that the wettability of hybrid systems is determined by surface tension, which is very important in the process of their interaction with the environment, for example: the surface of capillaries, tissues of blood vessel walls, skin, polymer tubes and surface coatings of medical equipment elements. This paper presents the results of wetting gels and lyomesophases with C- dots of model hydrophobic and hydrophilic surfaces: glass, nylon, polydimethylsiloxane and polytetrafluoroethylene. It has been found that low-viscosity gels wet these surfaces better than more viscous LC phases, and the adhesion of a hybrid sample doped with carbon dots in contact with glass and a membrane has the same order of magnitude for similar oligoethylene oxide-based lyomesophases. The adhesive characteristics of LLC and gel-like systems obtained in the study may be useful in the development of drug delivery methods for diagnostic and therapeutic nanosystems with improved functionality.

Введение

Лиотропные жидкие кристаллы и гели представляют собой уникальные материалы, обладающие свойствами, находящимися на стыке твердого тела и жидкости. В отличие от обычных жидкостей, где молекулы свободно перемещаются без какого-либо порядка, ЛЖК и гели демонстрируют определенную степень упорядоченности на микроуровне, что позволяет им

проявлять анизотропию — различие физических свойств в зависимости от направления. Этот феномен привлекает внимание ученых благодаря своему значению не только для понимания фундаментальных принципов организации материи, но и для практического использования в различных областях науки и техники [1].

Способность ЛЖК к самоорганизации и формированию упорядоченных структур делают их незаменимыми в ряде областей, в то время как гели,

благодаря своим уникальным реологическим свойствам, таким как способность сохранять форму под действием внешних сил, также нашли широкое применение в медицине, косметике и биотехнологиях [2].

В последнее время подход к доставке лекарств «по требованию» становится всё более распространённым, так как он позволяет точно контролировать дозировку, место введения и продолжительность высвобождения лекарства в ответ на внутренние или внешние раздражители [3]. Уже разработано множество систем, реагирующих на подобные воздействия, такие как наночастицы [4], конъюгаты лекарств с полимерами [5] и гидрогели [6]. Жидкокристаллические мезофазы, являются одним из последних достижений в области целенаправленной и регулируемой доставки лекарств.

Особый интерес привлекают надмолекулярно-организованные материалы, содержащие углеродные точки (CD) размером менее 10 нм с эффективной люминесценцией [7, 8]. Благодаря комплексу уникальных свойств, как экономичность и простота синтеза, высокий квантовый выход люминесценции, устойчивость к фотодegradации CD могут применяться при получении хемо- и термосенсоров, биомедицине, катализе и других приложениях [9, 10].

Хорошо растворимые в воде и низкотоксичные C-точки являются многообещающими люминофорами для использования в биовизуализации [10, 11]. Они могут выступать в качестве альтернативы известным полупроводниковым квантовым точкам (КТ) [12-14]. В данном аспекте в отличие от существующих люминесцентных материалов, C-точки имеют ряд преимуществ, таких как биосовместимость и низкая токсичность, высокие квантовые выходы, благодаря чему имеют перспективы применения в широком спектре областей современных технологий: электроника, оптика, катализ, в том числе в биологии, медицине и тераностике [9, 15-18]. Поэтому в настоящее время синтез и изучение углеродных точек, гибридов и композитов на их основе представляет собой интересное и актуальное направление современной науки, находящее возможное потенциальное применение в создании новых функциональных материалов с широким спектром характеристик [10, 19].

В свою очередь, исследование краевого угла смачивания – значимый этап в работе учёных и инженеров при изучении особенностей поведения жидких сред и химии поверхности в нанотехнологии и биомедицине. Данный метод успешно применяется для анализа характеристик функциональных покрытий [20]. Нахождение краевого угла смачивания позволяет изучить и целенаправленно подобрать поверхности с желаемыми гидрофильностью/гидрофобностью и адгезией. Полученные данные могут быть использованы при разработке биосенсоров и устройств, взаимодействующих с биоматериалами [21].

Способность водных растворов неионогенных поверхностно-активных веществ (НПАВ) к смачиванию поверхностей являлась объектом

интенсивных научных изысканий ввиду их обширного применения в управлении поверхностными процессами. Однако, полученные данные зачастую носили противоречивый характер, что обусловлено значительным воздействием физико-химической природы смачиваемого субстрата, его структурной организации, морфологических характеристик, а также условий формирования граничного слоя и ряда иных факторов. Данные аспекты приобретают особую значимость при изучении процессов смачивания полимерных материалов.

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы была получение многофункциональных гибридных сред на основе монододециловый эфир тетраэтиленгликоля ($C_{12}EO_4$), инкапсулированных «синими» углеродными точками (bCD) с наноразмерной структурой и исследование смачивающей способности, адгезионного взаимодействия данных систем с различными поверхностями.

Экспериментальная часть

В исследованиях [22, 23] описан синтез «синих» углеродных точек (bCD) в гидротермальных условиях. В данной работе для получения гибридных систем использовали водные растворы bCD с концентрацией 0,1 г/л. Гибридные среды на основе ПАВ, водных растворов bCD и деканола (dec) получали смешением компонентов при определенных массовых соотношениях. Все образцы подвергали центрифугированию при 25 °C (3000 об/мин) в течение 30 мин до полной гомогенизации системы. Для дальнейшего исследования образцы выдерживали в течение 14 суток при комнатной температуре (25 °C).

Определение типа лиомезофаз и гомогенности систем проводили методом поляризационной политермической оптической микроскопии на поляризационном микроскопе Olympus BX51 с нагревательной системой Linkam. Температуры фазового перехода мезофаз – изотропная жидкость регистрировали с точностью $\pm 2^\circ C$.

Смачивающую способность образцов определяли на основании измерения краевых углов смачивания методом сидящей капли на приборе Easy Drop Kruss DSA 20E (Германия) с системой автодозирования в термостатируемой ячейке при $25 \pm 1^\circ C$. В качестве исследуемых модельных поверхностей использовали стекло, нейлон марки N6 («Aldrich») и полидиметилсилоксан (ПДМС), который используется в качестве материала для изготовления микрофлюидных устройств. Адгезионные свойства ЛЖК исследовали также на мембранном фильтре (размер пор 0,45 мкм) из политетрафторэтилена (ПТФЭ) фирмы «Starlab», в качестве модели кожи. Точность определения угла смачивания составляла $\pm 0,1^\circ$ при $T = 25 \pm 1^\circ C$. Поверхностное натяжение гибридных сред определяли методом висящей капли на приборе Kruss Easy Drop DSA 20E (Германия) в термостатируемой ячейке при $T = 25 \pm 1^\circ C$.

Погрешность измерения поверхностного натяжения была около 3 %.

Шероховатость поверхностей была исследована с помощью атомно-силового микроскопа NanoEducator II (НТ-МДТ, Россия). Измерения проводились на воздухе в полуконтактном режиме с использованием кантилеверов HA_NC. Погрешность определения составляет 5% по латеральному размеру и менее 1 нм по высоте. Значения шероховатости исследуемых подложек близки к 1 нм.

Обсуждение результатов

Адгезия определяет взаимодействие между поверхностью и находящейся в контакте с ней системой, а смачивание – это явление, которое имеет место в результате этого взаимодействия. Изучение смачивания различных подложек лиомезофазами способствует пониманию этого взаимодействия ЛЖК с поверхностью. Наиболее важными факторами, влияющими на измерение краевого угла смачивания, являются химический состав образца, структура поверхности и неоднородности, а также другие второстепенные факторы. Влияние шероховатости поверхности было подробно описано в моделях Венцеля (при низкой степени шероховатости) и Кэсси и Бакстера (при высокой степени шероховатости) [24, 25]. Влияние шероховатости поверхности на результаты измерения угла смачивания, используя АСМ для определения параметров шероховатости и коррекции результатов [26]

В данной работе, представлены результаты смачивания гелей и лиомезофаз с углеродными точками модельных гидрофобных и гидрофильных поверхностей: стекло, нейлон, ПДМС и ПТФЭ. Фотографии текстур для ламеллярного ЖК и гелеобразной системы показаны на рисунке 1.

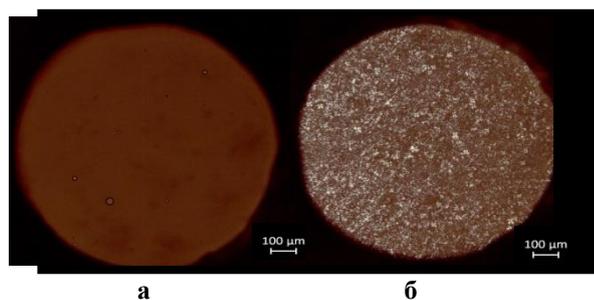


Рис. 1 – Микрофотографии в поляризованном свете гибридных систем $C_{12}EO_4/(H_2O+bCD)/dec$, формирующих гели (а) и ламеллярные фазы (б), $\times 100$

Fig. 1 – Polarized light micrographs of hybrid systems $C_{12}EO_4/(H_2O+bCD)/dec$ forming gels (a) and lamellar phases (b), $\times 100$

В качестве примера, на рисунке 2 представлены фотографии капели и кинетические кривые растекания (Рис. 3) гелей и лиомезофаз на стеклянной подложке и нейлоне (1), ПДМС (2) и ПТФЭ (3). При температуре эксперимента ($25^\circ C$) для полученных лиомезофаз кривые растекания имеют

характерный вид для подобного типа кривых [27, 28], в том числе и жидкокристаллических фаз [29].

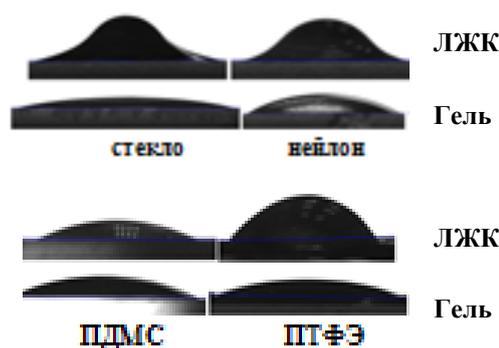


Рис. 2 – Фотографии сидячей капли для системы $C_{12}EO_4/H_2O+bCD/dec$ состава 45/50/5 % мас. (ЛЖК) и 15/80/5 % мас. (гель) на стекле, нейлоне, ПДМС, ПТФЭ

Fig. 2 - Photographs of a seated droplet for the $C_{12}EO_4/H_2O+bCD/dec$ system of composition 45/50/5 wt% (PLA) and 15/80/5 wt% (gel) on glass, nylon, PDMS, PTFE

Анализ полученных результатов показал, что на смачивающую способность оказывает поверхностное натяжение систем, а также тип формирующейся лиомезофазы. Маловязкие гелеобразные системы лучше смачивают изучаемые поверхности по сравнению с более вязкими лиомезофазами. Содержание bCD и ПАВ определяет тип формирующейся мезофазы, однако наблюдается наилучшее смачивание системами поверхностей с составом $C_{12}EO_4/H_2O+bCD$ (концентрация деканола постоянна и равна 5% мас.) 40- 50 % мас. водного раствора bCD (Рис. 4).

Краевой угол смачивания лиомезофазой $C_{12}EO_4/H_2O+bCD/dec$ (45/50/5 мас. %) поверхности мембраны ПТФЭ составил $67,7^\circ$. Согласно [29] ЛЖК системы на основе неионного олигоэтиленоксида характеризуются значительно более высокой смачивающей способностью по сравнению с цвиттер-ионными ПАВ. Так как амфифильные молекулы ламеллярной лиомезофазы содержат в своем составе полярные оксиэтиленовые группы, которые способны к донорно-акцепторному взаимодействию с полярными группами на поверхности ПДМС. Это способствует пониманию механизма гидрофилизации исследуемой поверхности.

Для концентрированных ЛЖК и гелеобразных систем действие полярной группы неионного ПАВ определяется их вертикальной ориентацией к поверхности полимера [30]. По отношению к поверхности неполярного полимера ПТФЭ молекулы олигоэтиленоксида ориентируются неполярной алкильной частью, наблюдается снижение смачивания, что может быть вызвано ростом полярности неионного ПАВ, увеличением сольватации оксиэтилированных звеньев, из-за повышения растворимости, и уменьшения поверхностной активности.

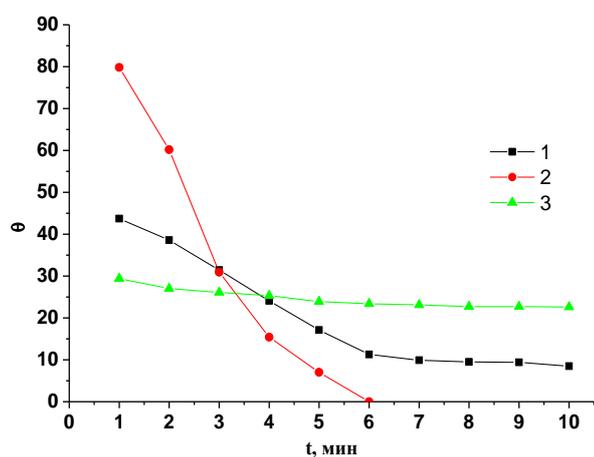


Рис. 3 – Кинетические кривые растекания систем C₁₂EO₄/H₂O+bCD/dec (45/50/5 мас. %) на стекле (1), нейлоне (2), ПДМС (3)

Fig. 3 – Kinetic spreading curves of C₁₂EO₄/H₂O+bCD/dec (45/50/5 wt%) systems on glass (1), nylon (2), PDMS (3)

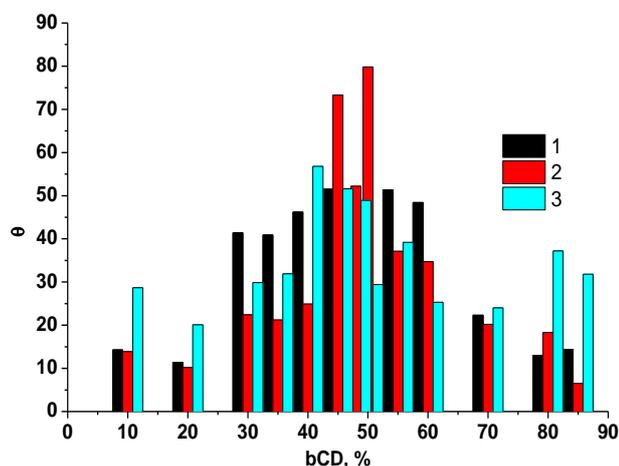


Рис. 4 – Диаграмма изменения краевого угла смачивания C₁₂EO₄/H₂O+bCD/dec от содержания С-точек на поверхностях: стекло (1), нейлон (2), ПДМС (3)

Fig. 4 – Diagram of variation of the wetting edge angle C₁₂EO₄/H₂O+bCD/dec from the content of C-dots on surfaces: glass (1), nylon (2), PDMS (3)

На основании данных по смачиванию производился расчет работы адгезии (W_a) системы к поверхности стекла, нейлона, ПДМС и ПТФЭ по уравнению Дюпре –Юнга: $W_a = \gamma_l(1 + \cos\theta)$, где γ_l – поверхностное натяжение исследуемого образца, $\cos\theta$ – косинус краевого угла смачивания подложки системой.

Анализ полученных данных, представленных в таблице 1, показал, что работа адгезии образца C₁₂EO₄/H₂O+bCD/dec (45/50/5% wt.), содержащего углеродные точки при контакте со стеклом и ПТФЭ имеет такой же порядок значений данной величины для ЛЖК на основе олигоэтиленоксида [27, 29, 30].

Таким образом, установлено, что на смачивающую способность и адгезионные характеристики гибридных систем с «синими» С-

точками оказывает поверхностное натяжение составов, также тип формирующейся лиомезофазы.

Таблица 1 - Поверхностное натяжение и значения работы адгезии систем на различных поверхностях

Table 1 - Surface tension and adhesion work values of the systems on different surfaces

Система		C ₁₂ EO ₄ /H ₂ O+bCD/dec 45/50/5 мас. %, (ЛЖК)	C ₁₂ EO ₄ /(Chit/L A 5/95 %) 50/50 мас. %, (ЛЖК) [20]
γ_t , мДж/м ²		24,00	21,46
W_a , мДж/м ²	стекло	41,35	49,94
	нейлон	28,25	-
	ПДМС	44,21	-
	ПТФЭ	33,03	34,08

Выводы

В работе синтезированы и исследованы смачиваемость многофункциональных гибридных сред на основе олигоэтиленоксида C₁₂EO₄ и «синих» С-точек в водно-деканольных средах, формирующие лиомезофазы и гели. Установлено, что смачиваемость в значительной степени гибридных систем определяется поверхностным натяжением систем, а также типом надмолекулярной организации молекул в ЛЖК. Гели лучше смачивают изучаемые поверхности по сравнению с более вязкими организованными в ламеллярную фазу жидкими кристаллами. Полученные данные по адгезионному поведению способствует пониманию механизма взаимодействия ЛЖК систем, допированных С-точками, с субстратами, а также понимание закономерностей релизинга лекарств из данных систем, показывая, что они являются перспективными для использования в биовизуализации при транспорте лекарственных средств и тераностике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00. Тема исследования «Создание научных основ получения новых multifunctional материалов широкого спектра применения» (FZSG-2023-0008).

Литература

1. A. Lange et al, *Physical Chemistry Chemical Physics* (2025). DOI: 10.1039/D4CP03060E.
2. Y. Ma et al, *Nano Energy*, **133**,110517 (2025). DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.110517.
3. I. Govindan, A. Paul, A. Rama et al, *AAPS PharmSciTech*, **26**, 6 (2025). DOI: 10.1208/s12249-024-02985-6.
4. Y. Song, Y. Li, Q. Xu, Z. Liu, *Int J Nanomedicine*, **12**, 87–110 (2017).

- 5.V. B. Junyaprasert, P. Thummarati, *Pharmaceutics*, **15**,2216 (2023).
- 6.S. Tanga, M. Aucamp, P. Ramburrun, *Gels*, **9**, 418 (2023). DOI: 10.3390/gels9050418.
- 7.Z. Zhao, L. Shi, W. Liu, Y. Yang, *Talanta*, **232**, 122423 (2021).
- 8.D. Chang, Z. Zhao, L. Shi, W. Liu, Y. Yang, *Talanta*, **232**, 122423 (2021).
- 9.R.R. Shamilov, A.E. Zavorotko, T.P. Sultanov, I.R. Vakhitov, Y.G. Galyametdinov, *J. Photochem. Photobiol., A*, 115791 (2024).
10. A.N. Bezrukov, A.I. Galeeva, A.S. Krupin, Yu.G. Galyametdinov, *Int. J. Mol. Sci.* **25**, 10, 5520 (2024). DOI: 10.3390/ijms25105520.
11. Z. Liu, X. Lu, M. Liu, W. Wang *Molecules*, **28**, 2957 (2023).
12. S. N. Baker, G. A. Baker, *Angewandte Chemie International Edition*, **49**, 38, 6726-6744. (2010).
13. M. Urbanski et al *Liquid Crystals*, **43**, 2, 183-194 (2016).
14. J. Geys et al, *Environmental health perspectives*,**116**, 12,1607-1613(2008).
15. M. Zhang et al, *Nano Research*, **12**, 815-821 (2019).
16. J. C. G. E. da Silva, H. M. R. Gonçalves, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **30**, 8, 1327-1336. (2011).
17. Y. Yao et al, *Int. J. Biol. Macromol.*, 135774. (2024). DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135774.
18. X. Liu, et al, *Sens. Actuators B: Chem*, **289**, 242-251 (2019).
19. J. Xu, et al, *J. Lumin.*, **266**,120303 (2024).
20. А.И.Галеева, Н.М. Селиванова, Ю.Г. Галяметдинов, *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **23**,4,38–48 (2023). DOI: 10.18083/LCAppl.2023.4.38.
21. К. С. Никитин, О. В. Мальцева, Н. Ж. Мамардашвили., Н.В. Усольцева, *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **23**, 4, 31–37 (2023). DOI: 10.18083/LCAppl.2023.4.31.
22. А. И. Галеева, А. Н. Безруков, А. С. Крупин, Ю. Г. Галяметдинов, *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **24**, 2, 32–42 (2024). DOI: 10.18083/LCAppl.2024.2.32.
23. А.Э. Заворотько, И.Д. Максимова, А.С. Крупин, Ю.Г. Галяметдинов, *Вестник технологического университета*, **27** (12), 18-22 (2024).
24. Б.Д. Сумм, 2-ое изд. М.: Издательский центр «Академия», 240 (2007).
25. R. Pasricha, D. Sachdev, *Nanofiber composites for biomedical applications.*, 157–196 (2017). DOI: 10.1016/B978-0-08-100173-8.00007-7.
26. N. M. Selivanova, A. I. Galeeva, Yu. G. Galyametdinov, *Int. J. Mol. Sci.*, **23**, 21, 13207 (2022). DOI: 10.3390/ijms232113207.
27. K. Grundke, P. Uhlmann, T. Gietzelt, B. Redlich, H.J. Jacobasch, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **116**, 93–104 (1996). DOI: 10.1016/0927-7757(96)03624-2.
28. M. Bracke, F. De Voeght, P. Joos, *Trends in Colloid and Interface Science III*, 142–149 (2007). DOI: 10.1007/BFb0116200.
29. А.И. Галеева, К.И. Ситдикова, Ю.Г. Галяметдинов, *Вестник Казан. технол. ун-та*, **15**, 18, 44-46 (2012).
30. С.А. Богданова, А.И. Галеева, Н.В. Саутина, Ю.Г. Галяметдинов, *Вестник Казан. технол. ун-та*, **11**, 43-47. (2011).
- 2.Y. Ma et al, *Nano Energy*, **133**,110517 (2025). DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.110517
- 3.I. Govindan, A. Paul, A. Rama et al, *AAPS PharmSciTech*, **26**, 6 (2025). DOI: 10.1208/s12249-024-02985-6
- 4.Y. Song, Y. Li, Q. Xu, Z. Liu, *Int J Nanomedicine*, **12**, 87–110 (2017).
- 5.VB Junyaprasert, P. Thummarati, *Pharmaceutics*, **15**,2216 (2023)
- 6.S. Tanga, M. Aucamp, P. Ramburrun, *Gels*, **9**, 418 (2023). DOI: 10.3390/gels9050418
- 7.Z. Zhao, L. Shi, W. Liu, Y. Yang, *Talanta*, **232**, 122423 (2021).
- 8.D. Chang, Z. Zhao, L. Shi, W. Liu, Y. Yang, *Talanta*, **232**, 122423 (2021).
- 9.R.R. Shamilov, A.E. Zavorotko, T.P. Sultanov, I.R. Vakhitov, Y.G. Galyametdinov, *J. Photochem. Photobiol., A*, 115791 (2024).
10. A.N. Bezrukov, A.I. Galeeva, A.S. Krupin, Yu.G. Galyametdinov, *Int. J. Mol. Sci.* **25**, 10, 5520 (2024). DOI: 10.3390/ijms25105520.
11. Z. Liu, X. Lu, M. Liu, W. Wang *Molecules*, **28**, 2957 (2023)
12. S. N. Baker, G. A. Baker, *Angewandte Chemie International Edition*, **49**, 38, 6726-6744. (2010).
13. M. Urbanski et al *Liquid Crystals*, **43**, 2, 183-194 (2016).
14. J. Geys et al, *Environmental health perspectives*,**116**, 12,1607-1613 (2008).
15. M. Zhang et al, *Nano Research*, **12**, 815-821 (2019).
16. J. C. G. E. da Silva, H. M. R. Gonçalves, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **30**, 8, 1327-1336. (2011).
17. Y. Yao et al, *Int. J. Biol. Macromol.*, 135774. (2024). DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135774.
18. X. Liu, et al, *Sens. Actuators B: Chem*, **289**, 242-251 (2019).
19. J. Xu, et al, *J. Lumin.*, **266**,120303 (2024).
20. А. И. Галеева, Н. М. Селиванова, Ю. Г. Галяметдинов, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **23**, 4, 38–48 (2023). DOI: 10.18083/LCAppl.2023.4.38.
21. К. С. Никитин, О.В. Мальцева, Н. Ж. Мамардашвили, Н. В. Усольцева, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **23**, 4, 31–37 (2023). DOI: 10.18083/LCAppl.2023.4.31.
22. А. И. Галеева, А. С. Крупин, А. Н. Безруков, Ю. Г. Галяметдинов, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **24**, 2, 32–42 (2024). DOI: 10.18083/LCAppl.2024.2.32.
23. А.Э. Заворотько, И.Д. Максимова, А.С. Крупин, Ю.Г. Галяметдинов, *Herald of Technological University*, **27** (12), 18-22 (2024).
24. B.D. Summ, 2nd ed. Moscow: Publishing Center "Academy", 240 (2007).
25. R. Pasricha, D. Sachdev, *Nanofiber composites for biomedical applications.*, 157–196 (2017). DOI: 10.1016/B978-0-08-100173-8.00007-7.
26. N. M. Selivanova, A. I. Galeeva, Yu. G. Galyametdinov, *Int. J. Mol. Sci.*, **23**, 21, 13207 (2022). DOI: 10.3390/ijms232113207.
27. K. Grundke, P. Uhlmann, T. Gietzelt, B. Redlich, H.J. Jacobasch, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **116**, 93–104 (1996). DOI: 10.1016/0927-7757(96)03624-2.
28. M. Bracke, F. De Voeght, P. Joos, *Trends in Colloid and Interface Science III*, 142–149 (2007). DOI: 10.1007/BFb0116200.
29. А.И. Галеева, К.И., Ситдикова, Ю.Г. Галяметдинов *Herald of Kazan Technological University*,**15**,18, 44–46 (2012).
30. S.A. Bogdanova, A.I. Galeeva, N.V. Sautina, Yu.G. Galyametdinov, *Herald of Kazan Technological University*, **11**, 43-47 (2011).

References

1.A. Lange et al, *Physical Chemistry Chemical Physics* (2025). DOI: 10.1039/D4CP03060E

© **А. И. Галеева** – канд. хим. наук, доцент кафедры Физической и коллоидной химии (ФКХ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, galeeva-alija@mail.ru; **Р. И. Хуснутдинова** – магистрант кафедры ФКХ, КНИТУ, ritahusnutdinova7@gmail.com; **А. Э. Заворотько** – аспирант кафедры ФКХ, КНИТУ, e-mail: zavorotco@mail.ru; **Ю. Г. Галяметдинов** – д-р хим. наук, проф., профессор кафедры ФКХ, КНИТУ; г.н.с. лаборатории Квантовой оптики в алмазах Казанский Физико-Технический Институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия, yugal2002@mail.ru.

© **А. И. Галеева** – PhD (Chemical Sci.), Associate professor, the department of Physical and Colloid Chemistry (PCC), Kazan National research Technologic al university (KNRTU), Kazan, Russia, galeeva-alija@mail.ru; **R. I. Khusnutdinova** – Student of the PCC department, KNRTU, ritahusnutdinova7@gmail.com; **A. E. Zavorotko** – PhD-student of the PCC dewpartment, KNRTU, zavorotco@mail.ru; **Yu. G. Galyametdinov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Full professor, Professor of the PCC department, KNRTU; Chief Researcher of the Laboratory of Quantum Optics in Diamonds, Zavoiysky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia, yugal2002@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 27.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 10.04.25.